第4章

実際の基板でのマッチング周波数の評価のしかた

基板の容量測定機の構成と実測例

猪瀬太一

ここでは実際の基板での回路マッチング評価について説明します．回路評価は基本的に周波数マッチング，負性抵抗（発振余裕度），ドライブ・レベルの評価が必要です．各評価方法の一例と実際の評価結果を併記して説明します．（筆者）

水晶振動子の測定

ここでは回路評価に必要な水晶振動子等価回路定数の測定方法について説明します．

● 水晶振動子単体の測定方法

水晶振動子の試験・評価には，インピーダンス測定器とネットワーク・アナライザが使われます．インピーダンス測定器は測定原理上，水晶振動子の測定パラメータ（共振周波数や等価パラメータなど）を正確に測定・直読できる利点を持っていますが，測定周波数の上限が40MHzにとどまっています．電子機器の高周波化に対応して，水晶振動子に求められる動作周波数および評価測定周波数も，最近では40MHzを越えてきており，インピーダンス測定器では十分カバーできない場合もあります．ネットワーク・アナライザは数十GHzまでカバーしており，高周波振動子の測定器として現在一般的に広く使われています．

ネットワーク・アナライザとは高周波回路，デバイスの高周波特性（インピーダンスなど）を測る計測器です．回路や素子に高周波を入力し，回路からの反射や通過を測って回路や素子の高周波特性を測ります．

◆ 測定系の準備

① ネットワーク・アナライザを用意

本評価ではE5100A（米国Agilent Technologies社，**写真1**）を使用します．

② E5100A用水晶振動子測定用π治具（Agilent Technologies社，**写真2**）を用意

測定する水晶振動子のサイズに合った治具類（**写真3**）が必要となります．本評価は4025サイズの水晶振動子で評価

写真1　ネットワーク・アナライザ

米国Agilent Technologies社の「E5100A」．E5100A/Bは10kHz～300MHzの周波数範囲のネットワーク・アナライザ．高分解能RFソースと最大4入力の入力部を持ち，能動および受動部品，回路の振幅，位相，群遅延レスポンスを測定および表示する．

写真2　水晶振動子測定用π治具

Agilent Technologies社の「41901A SMD π型回路テスト・フィクスチャ」．表面実装型の水晶発振器を測定するのに適した治具．

KeyWord　水晶振動子等価回路定数，周波数マッチング，インピーダンス測定器，ネットワーク・アナライザ，負性抵抗，直列共振周波数，リスト掃引，FETプローブ，電流プローブ点発振余裕度

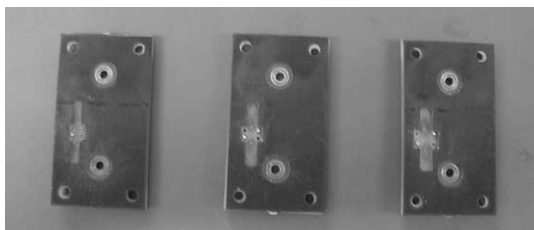



写真3　測定用冶具
左から3225，4025，5032サイズの測定冶具．41901A SMD π型回路テスト・フィクスチャとセットで使用する．

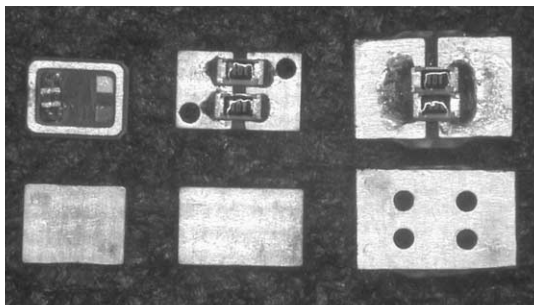



写真4　校正キッド（下段:ショート，上段:50 Ω）
左から3225，4025，5032の校正キッド．41901A SMD π型回路テスト・フィクスチャとセットで使用する．あるいはサイズにあったショート，50 Ωを作製する．

写真5　E5100（オプション002）のセットアップ
E5100（オプション002）はRF回路を内蔵しているが，オプションによってはアッテネータ内蔵型などさまざまなタイプがある．

しています．

③ 校正（キャリブレーション）用にショート，50Ωを用意

測定する水晶振動子のサイズに合った校正キッド（**写真4**）が必要となります．

◆ 水晶振動子の等価回路定数測定

回路評価を進めていく上で水晶振動子の等価回路定数データが必要となります．回路評価で使用する水晶振動子の等価回路定数データは，水晶振動子購入の際に水晶メーカに要求することをお勧めします．ここでは水晶振動子の等価回路定数測定方法についての例を簡単に紹介します．

ネットワーク・アナライザの詳しい操作方法は説明書などで確認してください．以下はAgilent Technologies社E5100（オプション002）による測定方法です．

① ネットワーク・アナライザのセットアップ

ネットワーク・アナライザと水晶振動子測定用π冶具をセットします（**写真5**）．

② ネットワーク・アナライザの操作方法

ネットワーク・アナライザはフロント・パネル（**写真6**）のハード・キーとソフト・キーを使用して操作を行います．ディスプレイの右側にある八つのキーがソフト・キーで，これ以外はハード・キーです．ソフト・キーを押すと，そのキーに対応したメニュー機能が選択されます．

③ ネットワーク・アナライザの初期設定

まず各モード（インピーダンス測定モード，π回路測定モード，W-CIパワー設定モード）の初期設定を行います．User CIは10Ωに設定します．

④ 直列共振周波数F_rとCI（crystal impedance）の測定

直列共振周波数F_r，CIは等価回路定数（R_1，C_1，L_1，C_0）の測定で必要となり，またF_rは回路評価でも必要となります．以下の測定条件を設定し校正してからF_r，CIを求めます．

1）測定条件の設定

12MHzを測定する場合の測定条件の例を次に示します．

センター：12MHz
スパン：1kHz
測定点数（NOP）：201
IFBW（intermediate frequency band width）：1kHz
パワー：10μW

2）校正の設定方法

上記測定条件を設定したら校正を行います．校正とは測定試料のシステム誤差を減少し，資料の測定における確度を向上させるためのものです．校正を行うには準備した校正キッド（ショート，50Ω）が必要になります．

π冶具をオープン状態にし，終了するとアンダ・バー表示OPENになります．π冶具に校正キッドのショートを入れて終了するとアンダ・バー表示SHORTになります．

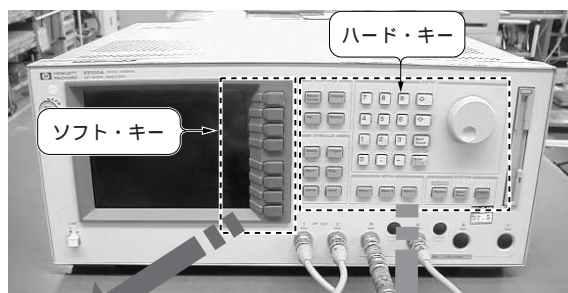



写真6
ネットワーク・アナライザのフロント・パネル
ディスプレイの右側にある八つのキーがソフト・キーで，これ以外はハード・キーとなる．ソフト・キーはキーに対応したメニュー機能が画面に選択される．写真のソフト・キー拡大図はハード・キー[Meas/Format]を押した時の選択メニューである．

π冶具に校正キッドの50Ωを入れて終了すると，アンダ・バー表示LOADになります．

最後に[DONE]キーを押して画面左上にCarと表示され校正が終了していることを確認します．

3) F_r，CIの測定

校正が終了したら測定する水晶振動子をπ冶具に挿入して，１回だけ掃引を行い測定します．

掃引がうまくいかない場合はスパンを5kHz程度広げて再度行います．波形が出たら位相0におけるインピーダンス値を読み取ります．

画面にF_rとCIの値が表示されます．

⑤ 等価回路定数(R_1，C_1，L_1，C_0)の測定

ここではリスト掃引を用いた等価回路解析の測定方法について紹介します．

等価回路定数はアドミタンス・チャートから求めますがC_0は副共振の影響を受けるので，アドミタンス・チャートから正確には求められません．そこでC_1，L_1，R_1はアドミタンス・チャートから，C_0はF_r×0.9の１点測定から求めます(**図1**)．

1) 初期設定

③で行った初期設定を行います．USER CIは使用する振動子のCIを入力し④の3)で求めたCIを活用します．

2) Segment1の周波数を計算

図1のSegment1の周波数を求めます(④の3)で求めた

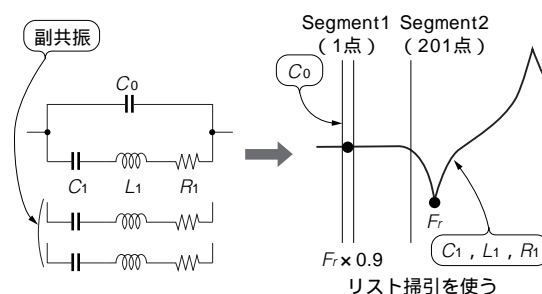



図1 リスト掃引を用いた等価回路解析のイメージ
黄色線が振動子の共振波形．共振点近傍でC_1，L_1，R_1を測定し，副共振の影響を受けない．振動子共振波形から離れた点でC_0を測定する．

F_rを$F_{r④}$とする)．

0.9×($F_{r④}$)＝Segment1の周波数

0.9×11.998398＝10.798558

3) Segment2の周波数を計算

次に**図1**のSegment2の周波数スパンを求めます．測定する振動子のF_rに対して－50ppmの周波数(START周波数)と+50ppmの周波数(STOP周波数)の値を求めます．

START周波数＝$F_{r④}$＋($F_{r④}$×－50)/1000000
＝11.998398＋(11.998398×－50)/1000000
＝11.998360

STOP周波数 $= F_{r④} + (F_{r④} \times +50) / 1000000$
$= 11.998398 + (11.998398 \times +50)$
$/1000000$
$= 11.998998$

4）リストの設定

リスト・テーブルの作成を行います．

5）リストの設定

Segment1に測定条件を入力します．

6）リストの設定

リスト設定画面内の〔INSERT EGMENT〕を押して，セグメント2を用意します．

7）リストの設定

Segment2に測定条件を入力します．

START：⑤の3）で求めた値，STOP：⑤の3）で求めた値，NOP：201，POWER：希望のパワー，IFBW：最適値

8）リストの設定

リストが完成したのでリスト作成モードから抜けます．

9）リストの設定

リスト掃引モードにします．

10）リストの設定

リスト掃引の表示が周波数ベースになっているので，設定した測定点が表示的に等間隔にならばせるオーダ・ベース・モードにします．

11）校正

④の2）と同様の校正（キャリブレーション）を行い，1回掃引します．

12）測定プログラムの作成

⑤の11）まで終了したら測定プログラムを作成します（C_0はフロント・パネルから解析できない）．BASIC画面を表示させ，以下のプログラムを入力します．

```
10 ASSING @E5100 TO 800
20 OUTPUT @E5100;"ANAOHC1"
30 OUTPUT @E5100;"ANAODATA"
40 OUTPUT @E5100;"ANARFULL"
50 OUTPUT @E5100;"EQUC0?";1.0798558E+7
60 ENTER @E5100:C0
70 OUTPUT @E5100;"EQUCPARS4?"
80 ENTER @E5100;C0Dammy,C1,L1,R1,Fs,
                                   Fr,F1,F2
90 PRINT"C0",C0
100 PRINT "C1",C1
110 PRINT "R1",R1
120 PRINT "L1",L1
130 END
```

ここで行番号50にある「1.0798558E＋7」の部分は⑤の2）準備②の計算結果を入力します．

13）等価回路定数の測定

プログラムの入力が終わったら［END EDIT］でプログラム作成画面を終了します．そして，プログラムを実行させて等価定数を測定します．

R_1，C_1，L_1，C_0の値が表示されます．

周波数マッチングの測定

回路評価を行う際には，まず振動子単体負荷容量と回路側負荷容量の容量差，つまり振動子単体周波数と回路発振周波数の差である周波数マッチングの状況を確認します．

● 回路側負荷容量の測定

ここからはいよいよ回路基板の評価にとりかかります．まず，回路周波数と購入した水晶振動子（評価用振動子）の周波数マッチング状況を確認します．周波数マッチング状況とは，回路基板の周波数（回路周波数）と評価用振動子の周波数の差，つまり回路基板の容量（回路側容量）と評価用振動子（振動子単体）の容量の差のことで，どれくらいの差が生じているかを確認します．

また，ここからは実際の回路評価での実測例も併記していきます．本評価では次に示す評価基板「CQ7144A」とTSX-4025@12MHzの回路マッチング評価を行いました．

評価基板：CQ7144A（Interface誌2006年6月号付録基板）
ルネサステクノロジのSH7144Fを搭載
評価用水晶振動子：TSX-4025（エプソントヨコム）
公称周波数：12MHz

◆ 回路評価の準備

回路評価に必要な振動子や測定器類の準備をします．

① 評価用振動子の準備

水晶メーカから基板評価に必要な周波数の水晶振動子を購入します．特別な要求スペックがない場合は手に入りや

すい水晶メーカ指定の標準品で，またICメーカ推奨の振動子があればICメーカ指定の水晶振動子で評価することをお勧めします．

評価用振動子が準備できたら以下の3点を確認します．

1）水晶振動子側負荷容量の確認

購入した振動子メーカ標準の負荷容量値．

2）常温における振動子単体の発振周波数Fの確認

上記負荷容量による振動子単体周波数F_L．

3）水晶振動子の等価回路定数

振動子の等価回路定数（F_r，R_1，C_1，L_1，C_0）．

上記1)，2)，3)については購入の際，水晶メーカに各データを要求することをお勧めします．

本評価の結果を次に示します．

型名TSX-4025　公称周波数12MHz

- 振動子負荷容量C_L = 7.8pF
- 振動子単体周波数F_L = 12.000034MHz
- 等価定数結果

F_r = 11.998398MHz

R_1 = 33.7Ω

L_1 = 70.519mH

C_1 = 2.495fF

C_0 = 1.11pF

② 測定器類の準備

回路評価に必要な基本的な測定器は，直流電源，周波数カウンタ，オシロスコープ，FETプローブ，電流プローブなどです．

回路基板によっては直流電源を2台使用したり，またUSBなどでパソコンとつなげて評価する場合もあるので，その都度，回路図や説明書などで確認して揃えます．

回路評価に必要な測定器の基本的な構成を**図2**に示します．

図2　マッチング評価測定器の全体構成

評価基板と電源を配線する（評価基板の電源は基板によってPCやコンセントとの場合もある）．次にオシロスコープと周波数カウンタをつなぎ，周波数を測定する時はFETプローブ，水晶電流を測定するときは電流プローブをオシロスコープにセットする．

③ 評価用部品の準備

1）チップ・コンデンサ

回路評価の際に回路定数（C_g，C_dなど）を設定するのに必要になります．目安として3pF～51pFくらいまでを用意すれば十分に対応できます．また，サイズ（1005，0604など）も評価基板によって異なります．

2）チップ抵抗

回路評価の際に回路定数R_dを設定するのに必要になります．目安として0Ω～10kΩ位までを用意すれば十分に対応できます．チップ・コンデンサと同様にサイズも評価基板によって異なります．

3）リード抵抗

回路評価で負性抵抗および発振余裕度を求める時に必要になります．目安として，

10Ω，20Ω，30Ω，40Ω，50Ω，60Ω，70Ω，80Ω，90Ω，100Ω，200Ω，300Ω，400Ω，500Ω，700Ω，1kΩ，3kΩ，5kΩ

などを揃えておくと十分に対応できます．

④ そのほかの準備

そのほかの準備としては，基板と電源をつなげるコード，はんだごてやはんだ吸い取り線，また細かい作業になるので顕微鏡などがあると便利です．作業がしやすい環境に整えます．

◆ 評価回路のセッティング

① 水晶振動子の搭載

回路基板にはんだごてなどを用いて評価用水晶振動子のHOT端子，GND端子を基板所定の位置に搭載します．搭載直後は振動子，回路基板に熱がかかっているので，常温に安定するまで放置してから測定を開始します．ただし発振チェックなどの作業は搭載直後に測定しても問題ありません．

② 回路周波数測定時のセッティング

評価回路基板の回路図および部品配置図から直流電圧との配線を行います．またオシロスコープ，周波数カウンタなどのセッティングも同時に行います．

写真7は実際に行った回路評価の全体構成です．

◆ 回路周波数および回路側負荷容量の求め方

① 回路発振周波数（F_R）を測定

セッティングが終了したらまず電源をONにし，振動子

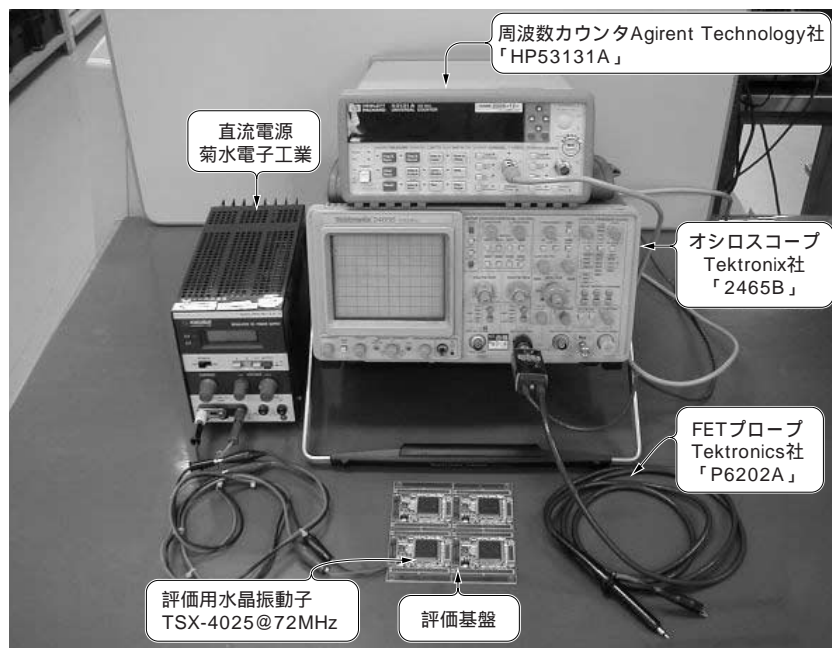
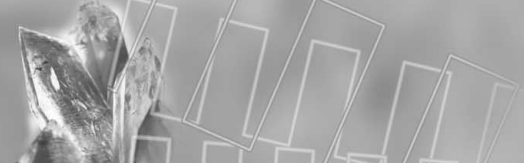



写真7
実際行った回路評価の全体構成
図2の全体構成にならい，評価基板，電源，オシロスコープ，周波数カウンタ，FETプローブを配線する．

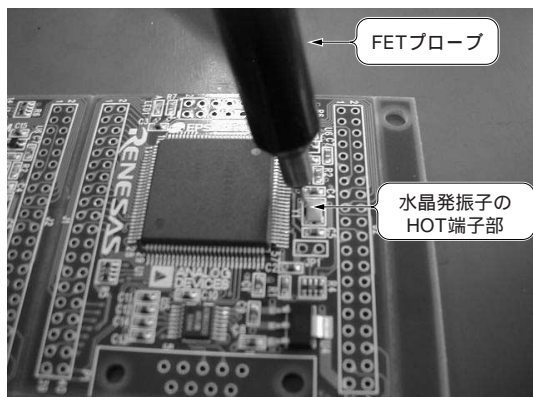



写真8　FETプローブを搭載した振動子のHOT端子に当てる
回路発振周波数 F_R＝12.000219MHz

が発振しているかのチェックを行います．FETプローブを搭載した振動子のHOT端子に当てる（**写真8**）とオシロスコープに波形が現れ，周波数カウンタに周波数が表示されます．

ここで周波数波形が出ない場合は，搭載状態が悪いか，もしくは配線が間違っていることなどが考えられるので再度確認してみます．回路基板，搭載した評価振動子の温度が安定したところで測定します．

② 回路側負荷容量の計算

回路発振周波数を測定したら，回路側負荷容量を計算で求めます．回路側の負荷容量を求めるには，

1）評価用振動子の等価回路定数（F_r，R_1，C_1，L_1，C_0）
2）評価用振動子回路発振周波数（F_R）

が必要となります．

式は第2章の

$((F_R - F_r)/F_r) = (C_1/2 \times (\text{回路}C_L + C_0))$………(1)

を使用し上記1)，2)を代入して回路側負荷容量（回路C_L）を計算します．

本評価の結果を次に示します．

等価回路定数（F_r，R_1，C_1，L_1，C_0）と回路発振周波数（F_R）を(1)式に代入して求める．

回路C_L＝7.11pF

③ マッチング状況の確認

回路側負荷容量を計算で求めたら，現状回路定数における周波数マッチング状況1)，2)を確認します．

1）回路基板の発振周波数（回路周波数F_R）と評価用振動子単体の周波数差
2）回路基板の容量（回路側容量）と評価用振動子単体の容量差

最終的には1)，2)それぞれの差が最小になる点が最適なマッチング・ポイントとなります．

⇒　回路側容量　振動子単体容量

本評価の結果を次に示します．

図3 負性抵抗測定時の回路図
水晶振動子のHOT端子部に抵抗を挿入して発振するかしないかを確認する．

写真9　負性抵抗測定用の水晶振動子
金線など導通するもので，水晶振動子のHOT端子にはんだで固定する．

上記から

- 回路発振周波数(F_R)＝12.000219MHz
  振動子単体周波数(F_L)＝12.000034MHz
  ⇒　$F_R - F_L$＝185Hz　$(F_R - F_L)/F_L$＝＋15.4ppm
  回路発振周波数は振動子単体周波数に対し +185Hz, +15.4ppmの差があることを確認
- 回路側負荷容量 回路C_L＝7.11pF
  振動子単体負荷容量C_L＝7.8pF
  ⇒　回路C_L－振動子単体C_L＝－0.69pF
  回路側負荷容量は振動子単体負荷容量に対し，－0.69pFの差がある事を確認.
  この差が0になれば理論上は周波数差も0になり最適なマッチング・ポイントとなる.

負性抵抗の測定

基板回路評価としてはマッチングのほかに負性抵抗(発振余裕度)やドライブ・レベル(励振レベル)も同時に評価しなければなりません.

ここでは負性抵抗の測定方法について説明します.

● 回路負性抵抗と発振余裕度

回路の負性抵抗の測定は，水晶振動子のHOT端子部に抵抗を挿入して発振するかしないかを見て，その負性抵抗R_Nを調べることができます．以下に負性抵抗測定時の回路図を示します(**図3**).

負性抵抗の絶対値は，挿入した抵抗値と水晶振動子の回路における負荷時等価抵抗R_eとを合わせた値になります.

- $|-R_i|$＝挿入抵抗$R + R_e$
- $R_e = R_1(1 + C_0/C_L)^2$
  R_e：水晶振動子の負荷時等価抵抗
  R_1：水晶振動子の等価直列抵抗

負性抵抗R_Nが求まったら発振余裕度を求めます.

写真10　負性抵抗測定用の挿入抵抗 *R*
リード抵抗を加工して一端をピンではんだ付けし，必要な挿入抵抗(回路評価の準備，リード抵抗の項を参照)を製作する．また抵抗値0Ω直列のものも製作しておくと便利．これは一例にすぎない．直接振動子のHOT端子にはんだ付けしてもかまわない．

- 発振余裕度＝負性抵抗R_i/R_e

通常，発振余裕度は5倍以上あれば問題ありません．発振余裕度が5倍未満の場合は回路定数を変更し負性抵抗R_iを大きくするか，もしくは水晶振動子の等価直列抵抗R_eを小さくして発振余裕度を5倍以上に保つようにします．水晶振動子の等価直列抵抗R_eを小さくする場合は水晶メーカに問い合わせ，仕様検討を行います.

● 回路負性抵抗の測定

① 測定の準備

1）水晶振動子の準備

まず回路基板から評価用水晶振動子をはんだごてなどを用いて取り外します．取り外したら金線など導通するもので水晶振動子のHOT端子にはんだで固定します(**写真9**).

写真11　負性抵抗測定用水晶発振子マウント部
回路基板の振動子HOT端子部にピンをはんだで固定．

写真12　負性抵抗測定時のセッティング
ピンで固定された回路基板の振動子HOT端子部（写真11）に挿入抵抗 R を挿入し，金線などで固定した足付き振動子をつなぎ合わせる．写真12では振動子HOT端子部の一方に挿入抵抗 R，もう一方に直列（抵抗:0 Ω）を挿入している．

表1　発振余裕度

発振判定	挿入抵抗 R［Ω］	負性抵抗 $\|-R_N\|$［Ω］	発振余裕度 $\|-R_N\|/R_e$
OK	500	545	7
OK	1000	1045	14
OK	1600	1645	22
NG	2000	2045	―

2）挿入抵抗 R の準備

挿入抵抗 R はリード線を加工したものを使用します．挿入したいリード抵抗にピンをはんだで固定します（**写真10**）．

3）回路基板振動子マウント部の準備

回路基板の振動子マウント部にピンをはんだごてで固定します（**写真11**）．

② 実際の測定

1）セッティング

評価用振動子に挿入抵抗 R をつなぎ，それを回路基板のXtal部に搭載します（**写真12**）．

2）発振確認

セッティングが終了したら，電源をONにしてオシロスコープで波形を確認します．挿入抵抗 R を小さい値から大きな値に変えて発振しなくなるポイントを探します．

この時，抵抗 R を挿入したことによる発振出力の低下，周波数の変化は無視し，単に発振したか否かを判定します．本評価での結果を次に示します．

評価基板（CQ7144A）で負性抵抗 R_i を測定した．またその時の発振余裕度は**表1**の通りとなる（振動子の R_1 規格値は最大57Ω）．

負性抵抗は，

$|-R_N|$ ＝ 挿入抵抗 R ＋ R_e

で求める．また R_e は，$R_e = R_1 (1+C_0/C_L)^2$ に等価定数結果を代入して求める．

$R_e = 33.68(1+1.11/7.8)^2 = 45$

発振余裕度を計算する際の R_e は R_1 に水晶振動子 R_1 の規格値を入れて計算する．

$R_e = 57(1+1.11/7.8)^2 = 74$

発振余裕度 $|-R_N|/R_e = 1645/74 = 22$

以上の結果から発振余裕度は22倍以上あるので問題ないことを確認した．

ドライブ・レベルの測定

ここでは，電流プローブを使用したドライブ・レベルの測定方法について説明します．

● 水晶電流およびドライブ・レベル（励振レベル）

回路上で動作している水晶振動子のHOT端子に電流プローブを当て，オシロスコープで電圧値 V_{pp} を測定し，その実効値から水晶振動子に流れる電流値を換算します．

第2章で説明があったようにドライブ・レベルとは水晶振動子が振動する電力をいい，

ドライブ・レベル $P = I^2 \times R_e$

I ：水晶振動子に流れる電流

R_e ：振動子の負荷時抵抗

で表されます．電流プローブで I を測定し，ドライブ・レベルを求めます．ドライブ・レベルは製造仕様の規格内で

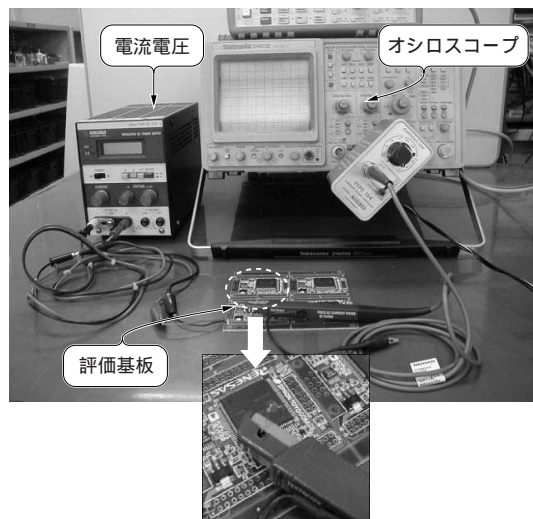



写真13　ドライブ・レベル測定時のセッティング
ピンで固定された回路基板の振動子HOT端子部（写真11）に足付き振動子を挿入する．オシロスコープに電流プローブを接続して，足付き振動子にセッティングする（拡大写真）．

写真14 オシロスコープでV_{pp}を測定する

あれば問題ありませんが，規格外の場合は回路定数を変更し水晶電流Iを小さくする必要があります．もしくは水晶メーカに問い合わせ，仕様検討を行います．

● ドライブ・レベルの測定

① 測定の準備

1）水晶振動子の準備

負性抵抗測定用の水晶振動子と同様に金線など導通するもので水晶振動子のHOT端子にはんだで固定します（**写真9**）．

2）回路基板振動子マウント部の準備

負性抵抗測定用Xtalマウント部と同様に回路基板の振動子マウント部にピンをはんだごてで固定します（**写真11**）．

3）電流プローブの準備

電流プローブをオシロスコープに接続して電流プローブの電源をONします．

② 実際の測定

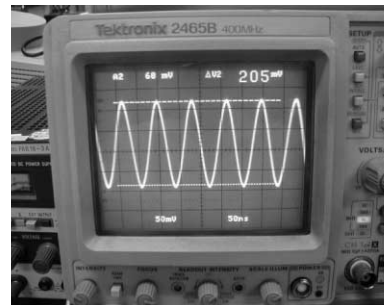
1）セッティング

評価用振動子の足に電流プローブを通し，回路基板のXtal部に搭載します（**写真13**）．

2）発振の確認および測定

セッティングが終了したら回路の電源（スイッチ）をONにします．

オシロスコープにて発振を確認したら，波形のV_{pp}を測定します（**写真14**）．

V_{pp}をdivに換算して，その実効値を求めます．算出した実効値divから水晶電流に換算しドライブ・レベルを求めます（詳しくは電流プローブの説明書を参照）．

本評価の結果を次に示します．

オシロスコープで$V_{pp}=0.205$（V）を確認した．この結果から水晶電流値を計算する．

- プローブの設定：1［mA/div］，
- オシロスコープの設定：50［mV/div］の時

1）V_{pp}をdivに換算すると

V_{pp}/50［mV/div］＝205/50＝4.1［div］

2）1）の実効値を求める

4.1/（2$\sqrt{2}$）＝1.45［div］

3）ここで電流プローブのインピーダンスが50Ωであることから

50［mV/div］/50［Ω］＝1［mA/div］となる．

4）水晶電流Iは

1.45［div］×1［mA/div］＝1.45［mA］

5）ドライブ・レベルPは

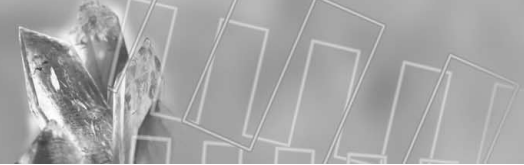
$P=I^2\times R_e=1.45\times1.45\times45=95$［μW］

従って，この結果から，Pはドライブ・レベル規格100μW以内であり問題ないことを確認した．

最適な周波数マッチングの取り方

回路評価を行う際のチェック・ポイントとして，①周波数マッチング，②負性抵抗（発余裕度），③ドライブ・レベルの評価が必要ですが，これら①，②，③すべての評価項目に対し回路上問題ない値となることが最適な周波数マッチングの最終目標となります．

● 周波数マッチングの最適化

周波数マッチングの最適化とは，

回路発振周波数＝振動子単体周波数

にすることで，これはすなわち，

回路側容量＝振動子単体容量

ということです．要するに回路側容量と振動子単体容量がイコールになれば回路の発振周波数と振動子単体の周波数がイコールになる，すなわちマッチングするということになります．

逆に，

回路側容量≠振動子単体容量

のときは周波数マッチングが取れないので回路側容量を調整するか，もしくは振動子単体容量を調整しなければなりません．

① 回路側容量の調整

回路側容量を調整する場合は，回路のC_g，C_dを変更して振動子単体の周波数（振動子単体容量）に合わせ込むようにします．このときC_g，C_d変更の目安値は計算で求めることができます．

回路側容量C_LをC_iとすると，

$$C_i = C_g \times C_d / (C_g + C_d) + C_s$$

ここでC_sとは回路の配線容量や素子の寄生容量，浮遊容量のことを表します．

C_i＝振動子単体容量C_L

となればよいので，

$C_g \times C_d / (C_g + C_d) + C_s$＝振動子単体容量$C_L$

$\Rightarrow C_g \times C_d / (C_g + C_d)$＝振動子単体容量$C_L - C_s$

ということで，C_g，C_dは所定の振動子単体容量からC_sを引いた値から求めることができます．

これはあくまでも目安値なので，実際はC_g，C_dを変更して周波数を確認しながら合わせ込みます．本評価における結果を次に示します．

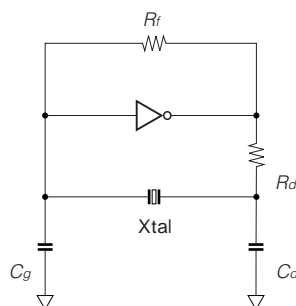



図4　発振回路図

② 振動子単体容量の調整

この場合は振動子単体容量を回路側容量に合わせ込んでもらい，その水晶振動子を購入して，再度マッチング評価を行います．

ただし注意点として，回路側容量が小さい場合は発振周波数の変化量が大きくなるので，回路側の微小変化の影響を受けやすく，周波数安定度の悪化原因となります．そのため，周波数安定度の必要性の有無などユーザの最終用途に応じた適切な条件設定が重要です．

上記から回路発振周波数は振動子単体周波数に対し＋185Hz，＋15.4ppmのずれがあることを確認したので，マッチングの最適化が必要．

● 回路側容量の調整

回路定数C_g，C_dを変更してマッチング評価を行った．

C_g＝7.8pF　⇒　10pF

C_d＝7.8pF　⇒　9pF

その結果，

回路発振周波数（F_R）＝12.000038MHz

となり，

振動子単体周波数（F_L）＝12.000034MHz

との差が＋0.33ppmとなり，ほぼマッチングした．

また，この時の各容量は，

回路側負荷容量 回路C_L＝8.01pF

振動子単体負荷容量C_L＝7.8pF

となる．

● 負性抵抗（発振余裕）の最適化

発振余裕度は水晶振動子の等価直列抵抗R_1（最大，仕様値）でのR_eに対し5倍以上に確保するのが望ましいと考えます．発振余裕度が5倍未満の場合，回路ばらつきによる発振不安定，不発振または発振立ち上がり時間が長くなるなどの不具合現象が発生しやすくなります．この場合C_g，C_d，R_dの回路定数を変更し，5倍以上になるよう設定します（**図4**）．

C_g，C_d，R_dを小さくする方向で負性抵抗は大きくなり，発振余裕度も大きくなりますが，回路定数C_g，C_d，R_dを変更することで回路側負荷容量も変化します．

また水晶振動子の等価直列抵抗R_eを小さくすれば発振余裕度は大きくなりますが，この場合は水晶メーカに問い合わせ，仕様検討を行うことをお勧めします．

表3 最適な回路定数の決め方

マッチングの最適化	負性抵抗の最適化	励振レベルの最適化	対処法
○	○	○	A
○	○	×	B
○	×	○	C
×	○	○	D
×	×	×	E
○	×	×	F
×	○	×	G
×	×	○	H

A…評価時の回路定数で問題ない．
B…ドライブ・レベルに関しては水晶振動子の仕様の見直し，つまり評価結果でのドライブ・レベルが振動子で問題ないかを確認する必要がある．問題なければ振動子の仕様に反映してもらう．
C…負性抵抗（発振余裕度）に関しては水晶振動子の仕様（R_1の最大値）を見直し，つまり発振余裕度が5倍以上になるような振動子等価直列抵抗規格R_1の変更が問題ないかを確認する必要がある．問題なければ振動子の仕様に反映してもらう．
D…周波数マッチングに関しては振動子単体容量を回路側負荷容量に合わせ込んでもらう．
E…B＋C＋D　F…B＋C　G…B＋D　H…C＋D

本評価での結果を次に示します．

周波数マッチングの最適化で回路定数を変更したので再度評価を行う．回路負性抵抗の測定と同様の評価を行った結果を**表2**に示す．

以上の結果から発振余裕度は19倍以上あるので問題ないことを確認した．

表2　発振余裕の評価結果

発振判定	挿入抵抗 R［Ω］	負性抵抗 $\|-R_N\|$［Ω］	発振余裕度 $\|-R_N\|/R_e$
OK	500	545	7
OK	1000	1045	14
OK	1400	1445	19
NG	1600	1645	―

● ドライブ・レベル（励振レベル）の最適化

ドライブ・レベルは通常，水晶振動子の仕様内に抑えることが望ましいと考えます．大まかな目安としては100μW以下が望ましい値ですが，水晶メーカの各仕様によって若干異なります．

高いドライブ・レベルの場合，周波数の変動と安定度の劣化や等価回路パラメータの変動，周波数歪みの増大などの特性劣化を引き起こし，極端な場合，異常発振の繰り返しや故障，最悪の場合は破壊を招く恐れもあります．

従って，高ドライブ・レベルの場合も回路定数C_g，C_d，R_dを変更して最適条件を求めます．

ドライブ・レベルを抑えるにはC_g，C_dを小さくすればよいのですが，回路側負荷容量も変化します．また最も効果的な手法としてはR_dを大きくすることですが，負性抵抗も小さくなります．本評価における結果を次に示します．

周波数マッチングの最適化で回路定数を変更したので再度評価を行います．ドライブ・レベルの測定と同様の評価を行う．オシロスコープでV_{pp}＝0.225Vを確認，計算すると，次のようになる．

水晶電流I＝1.6mA

ドライブ・レベルP＝115μW

ドライブ・レベルが規格100μWを超え，規格外であることを確認した．

● 評価結果による回路定数の対処法

最適な回路定数は，①マッチング最適化，②負性抵抗（発振余裕度）の最適化，③ドライブ・レベルの最適化の兼ね合いで決めることになります．①，②，③のすべてが合致する回路定数（C_g，C_d，R_d）がベストですが，合致しない場合もあるので，その対処法を**表3**に記します．

本評価での結果を次に示します．

上記の結果，対処法Bであることがわかる．
この場合ドライブ・レベルの仕様の見直しが必要．TSX-4025@12MHzに関してはドライブ・レベル115μWでも特性劣化がなく問題ないことが確認されたので，最終的な回路定数は周波数マッチングの最適化で決めたC_g＝10pF，C_d＝9pFで問題ないということになる．

いのせ・たいち
エプソントヨコム（株）　開発技術統括部 設計部

<筆者プロフィール>
猪瀬太一．1997年入社．設計部に配属されて以来10年間，振動子設計業務一筋です．現在の業務は振動子設計のほか，客先回路評価やサンプル活動を中心に行っています．サッカーなど体を動かすことが好きで，その後の一杯が至福の時です．